

ФІЗИКА ТА МЕХАНІКА ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ

УДК 621.914.1

С.И. ДЯДЯ, канд. техн. наук, Запорожье, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТОНКОСТЕННОГО ЭЛЕМЕНТА ДЕТАЛИ ПРИ КОНЦЕВОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ С АВТОКОЛЕБАНИЯМИ

У статті розглянуто причини виникнення хвиль на обробленій поверхні тонкостінного елемента деталі після зустрічного кінцевого циліндричного фрезерування з автоколиваннями.

Ключові слова: кінцево циліндричне фрезерування, автоколивання

В статье рассмотрены причины образования волн на обработанной поверхности тонкостенного элемента детали после встречного концевой цилиндрической фрезерования с автоколебаниями

Ключевые слова: концевой цилиндрической фрезерование, автоколебания

This article presents reasons of the wave's formation on the machined surface of thin-wall parts after counter cylindrical milling with chatter.

Keywords: counter cylindrical milling, chatter

Проектирование деталей с целью их использования в заданных условиях эксплуатации, кроме выбора материала предусматривает и определение как геометрических размеров и формы ее поверхностей, так необходимых параметров их качества (физико-химико-механическое состояния, точность, шероховатость и т.п.), в зависимости от которых проектируется технологический процесс изготовления изделия. В настоящее время еще достаточно часто применяют лезвийную обработку, при которой точность размера, формы, шероховатость поверхности, стойкость инструмента и производительность в значительной мере определяются как кинематическими параметрами процесса обработки, так и характером взаимодействия обрабатываемой детали с инструментом. Например, наличие упругих отжатий из-за недостаточной жесткости элементов обрабатывающей системы (детали, инструмента, приспособления и т.п.), колебаний, как вынужденных, так и автоколебаний, могут привести к образованию волнистости на обработанной поверхности. Это может в определяющей мере влиять на работоспособность самой детали, узла, в котором она стоит, или изделия в целом. На рис. 1,а показана поверхность на обработанной детали (рабочего колеса компрессора), получаемая после фрезерования ее тонкостенных элементов (лопаток), ее профилограмма (рис. 1,б) и параметры образующейся при этом волны – шаг S_{wi} и высота W_{zi} .

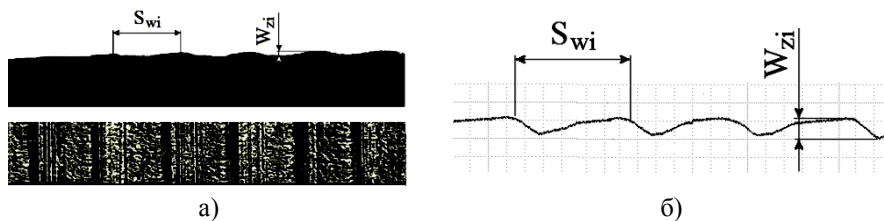


Рисунок 1 – Волнистая поверхность детали после встречного концевой цилиндрической фрезерования:
а) обработанная поверхность; б) профилограмма

В работах отечественных и иностранных исследователей [1-13] установлено, что деталь при резании, в том числе и при фрезеровании (как при встречном, так и при попутном) имеет место самонастраиваемый (самоорганизующийся) колебательный процесс с определенным периодом автоколебаний (T_{AK}), периодом свободных колебаний детали ($T_{СКД}$) и размахом колебаний (R_i) (рис. 2).

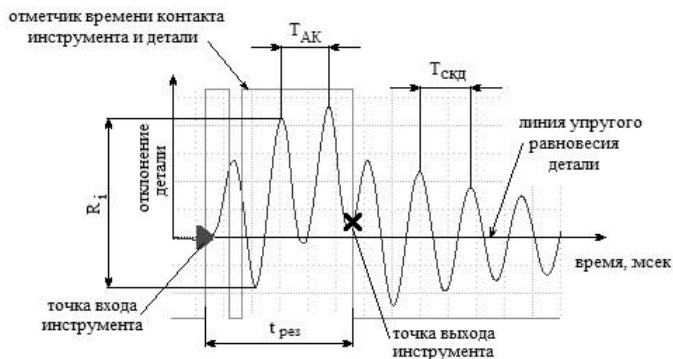


Рисунок 2 – Фрагмент осциллограммы автоколебаний детали при концевом цилиндрическом встречном фрезеровании [15]

Характерной особенностью встречного фрезерования является то, что резание начинается с минимальной толщины срезаемого слоя практически необладающего демпфированием. Поэтому автоколебания возникают сразу после врезания инструмента в деталь. В настоящее время еще недостаточно изученным является вопрос о том, каким образом колебания, возникающие при концевом цилиндрическом фрезеровании тонкостенных элементов детали, характеризуемые, в том числе, и относительно невысокой жесткостью режущего инструмента (концевые фрезы небольшого диаметра ($\varnothing 6-10$ мм) и относительно большой длины режущей части (60-80 мм)), влияют на механизм формирования обработанной поверхности.

Целью данной статьи является изучение на основе экспериментальных исследований динамического состояния (автоколебаний) маложестких элементов обрабатывающей системы механизма формирования поверхности при встречном концевом цилиндрическом фрезеровании.

Исследования проводились на специальном стенде, позволяющем создавать различные характеристики упругой системы [14], и по специально созданной методике [15], которая позволяет с использованием современной регистрирующей техники записывать осциллограммы колебаний элементов системы (детали и инструмента), характеризующих законы их движений, собирать и обрабатывать данные о процессе резания.

Кроме этого экспериментально установлено, что независимо от свойств обрабатываемого материала всегда есть третья скоростная зона [16], в которой действуют автоколебания, существенно влияющие на стойкость инструмента и качество обработанной поверхности. Как правило, эта зона охватывает режимы резания черновой и получистовой обработки материалов, применяемых, в частности, в авиакосмической промышленности. Динамические свойства тонкостенного элемента детали создавались путем закрепления упругого элемента с обрабатываемым материалом на необходимый вылет. При этом для исключения существенного влияния концевой фрезы на колебания при резании ее конструкция имеет жесткость в три раза больше, чем упругого элемента. Обрабатываемый материал специально выбран с такими свойствами, чтобы не влиять на стойкость инструмента при проведении экспериментов. Для обеспечения резания в третьей скоростной зоне были выбраны следующие условия.

1. Оборудование - вертикально-фрезерный станок FWD-32J.
2. Инструмент – специальная однозубая, прямозубая фреза $\varnothing 55$ мм с регулируемым положением зуба [20]. Материал режущей части ВК8; частота свободных колебаний 833 Гц.
3. Обрабатываемый материал – Сталь 3кп.
4. Упругий элемент – вылет 80мм, толщина 6мм, частота свободных колебаний 390 Гц.
5. Режимы резания: частота вращения шпинделя, $n_{\text{шп}} = 280$ об/мин; подача на зуб, $S_z = 0,1$ мм; осевая глубина, $a_p = 3,4$ мм; радиальная глубина, $a_e = 0,5$ мм; направление подачи – встречное; резание свободное.

Для изучения процесса образования обработанной поверхности необходимо иметь представление о поверхности резания. Поэтому для ее получения стол с деталью в процессе фрезерования перемещали вертикально вниз, выводя инструмент из детали.

Сравнение поверхности резания с осциллограммой указывает на идентичность их формы (рис. 3).

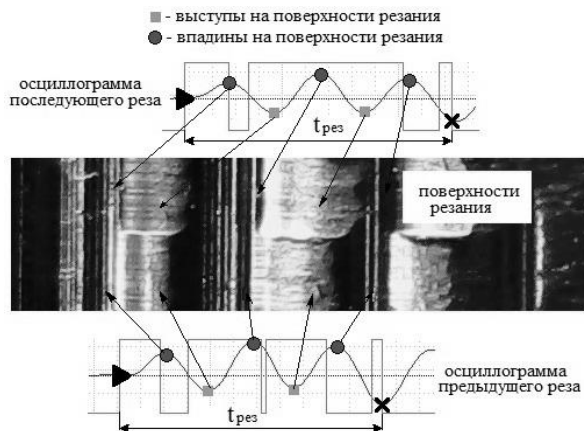
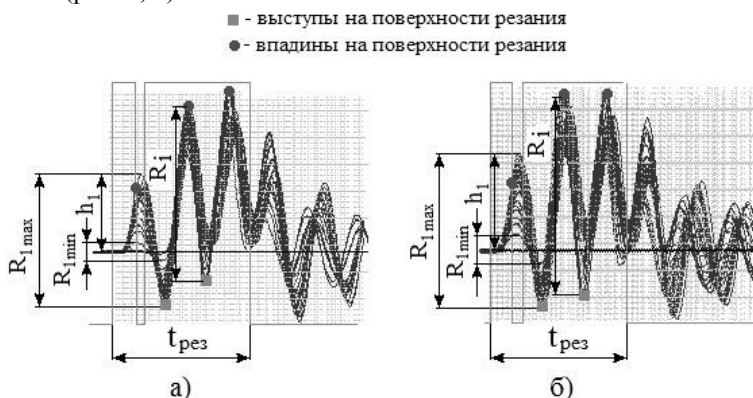


Рисунок 3 – Поверхности резания и соответствующие им осциллограммы

Так как поверхность резания образуется при совместном контактном движении инструмента и детали во время резания, а на осциллограмме записывается это движение, то по ней можно судить о форме поверхности резания. Это важно для того, чтобы можно было изучать изменение на поверхности резания при формообразовании. Изучая форму осциллограмм, было отмечено периодическое изменение размаха колебаний (R_i) всех волн, но сильнее это отражается на первой волне, изменяющей в большей степени эту величину от наибольшего ($R_{1\max}$) до наименьшего значения ($R_{1\min}$), что наглядно видно при наложении последовательных осциллограмм колебаний детали при резании (рис. 4, а), а также периодичность таких изменений (рис. 4, б).

Рисунок 4 – Периодичность изменения размаха волн автоколебаний
а) осциллограммы первого периода; б) осциллограммы второго периода

Кроме того следует обратить внимание и на отклонение первой волны автоколебаний от линии упругого равновесия h_1 , которое также меняет свое значение от наибольшего до наименьшего. Это отклонение участвует в образовании впадины на поверхности резания.

В табл. 1 записаны величины отклонения первой волны автоколебаний от линии упругого равновесия h_1 (рис. 4, а), измеренные по осциллограммам, охватывающих несколько повторяющихся циклов.

Таблица 1 – Отклонение от линии упругого равновесия первой волны автоколебаний, мм

Номер реза	Номер периода повторения цикла					
	1	2	3	4	5	6
1	2	3	4	5	6	7
1	0,108	0,088	0,110	0,102	0,105	0,112
2	0,105	0,085	0,098	0,101	0,100	0,109
3	0,100	0,085	0,092	0,097	0,100	0,095
4	0,094	0,076	0,088	0,093	0,089	0,091
5	0,091	0,075	0,084	0,089	0,085	0,090
6	0,091	0,074	0,083	0,087	0,076	0,089
7	0,090	0,073	0,080	0,085	0,079	0,085
8	0,090	0,069	0,075	0,083	0,092	0,084
9	0,089	0,065	0,071	0,083	0,093	0,085
10	0,086	0,062	0,069	0,083	0,088	0,081
11	0,085	0,061	0,066	0,080	0,077	0,080
12	0,085	0,058	0,065	0,078	0,077	0,080
13	0,082	0,058	0,061	0,075	0,060	0,076
14	0,077	0,057	0,056	0,073	0,063	0,077
15	0,076	0,058	0,054	0,071	0,063	0,076
16	0,066	0,052	0,053	0,071	0,059	0,075
17	0,061	0,050	0,050	0,070	0,048	0,074
18	0,049	0,038	0,050	0,062	0,048	0,052
19	0,039	0,023	0,047	0,059	0,043	0,051

Продолжение табл. 1

20	0,032	0,023	0,037	0,055	0,040	0,051
21	0,013	0,012	0,027	0,052	0,029	0,050
22	0,002	0,004	0,025	0,032	0,027	0,046
23			0,017	0,030	0,013	0,036
24			0,006	0,020	0,004	0,029
25				0,007		0,017
26						0,015
27						0,008

По результатам измерения построены графики изменения отклонения первой волны осциллограммы от линии упругого равновесия на каждом последующем резе, составляющих период (рис. 5).

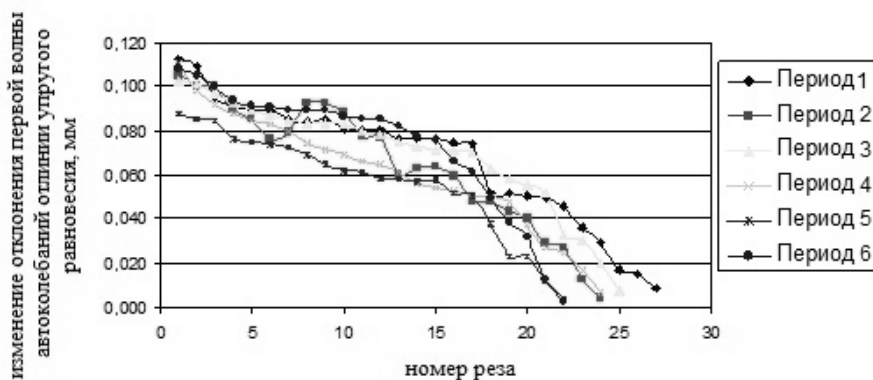


Рисунок 5 – Изменение отклонения первой волны автоколебаний от линии упругого равновесия

Для проверки того, что лунка от первой волны автоколебаний является формообразующей обработанной поверхности, после фрезерования была записана профилограмма (рис. 6). Графики, построенные на рис. 5, и профиль обработанной поверхности (рис. 6) идентичны как по внешнему виду, так и по размерам высот и длин волн.



Рисунок 6 – Профилограмма поверхности после встречного фрезерования

Поэтому можно сказать, что формообразующая лунка при встречном фрезеровании остается от первой волны автоколебаний. Ее переменная глубина определяет высоту волны на обработанной поверхности, а ее шаг зависит от количества резов в пределах повторяющихся периодов и величины подачи.

Для подтверждения того, что лунка от первой волны определяет форму обработанной поверхности, были проведены ее исследования после обработки на разных частотах вращения шпинделя, входящих в третью скоростную зону колебаний.

В табл. 2 приведены наложенные осциллограммы и профилограммы, полученные при фрезеровании с разными частотами вращения шпинделя и одинаковыми другими условиями, охватывающие один период изменения первой волны, и ее параметры, взаимосвязанные с обработанной поверхностью.

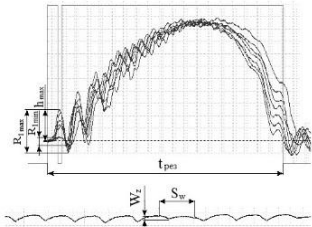
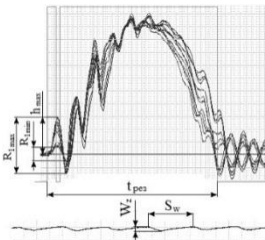
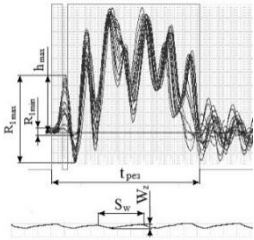
Лунки, оставляемые инструментом на обработанной поверхности при встречном фрезеровании, располагаются с шагом, равным подаче на зуб. При повторяющихся циклах изменения глубины лунки от наибольшего значения до наименьшего шаг волны можно определить как произведение количества резов за период ($n_{\text{рез}}$) на подачу на зуб (S_z).

$$S_w = n_{\text{рез}} \cdot S_z \quad (1)$$

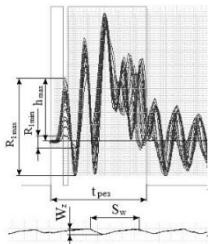
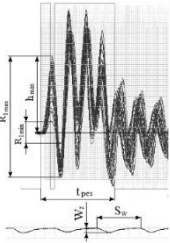
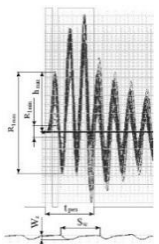
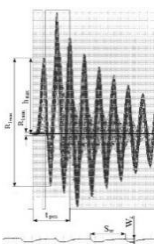
Данные табл. 2 согласовываются с приведенными выше результатами шага волны и ее высоты и подтверждают, что шаг волны на обработанной поверхности формируется именно лунками первой волны автоколебаний, имеющих разную глубину.

Разные значения высоты волны на обработанной поверхности и наибольшего отклонения первой волны автоколебаний от линии упругого равновесия, приведенные в табл. 2, связаны с тем, что деталь и фреза имеют разные жесткости. Поэтому их упругие отжатия при автоколебаниях будут неодинаковые: у фрезы – меньшие, у детали – большие.

Таблиця 2 – Наложенные осциллограммы колебаний детали при разных частотах вращения шпинделя

Частота вращения шпинделя об/мин	Наложение осциллограмм, профилограмма	Наибольшее отклонение от линии упругого равновесия, h_{\max} , мм	Количество резов, $n_{\text{рез}}$	Шаг волны на профилограмме, S_w , мм	Высота волны на профилограмме, W_z , мм
1	2	3	4	5	6
112		0,052	7	0,65	0,044
140		0,073	10	0,93	0,060
180		0,081	14	1,35	0,074

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6
224		0,091	18	1,88	0,088
280		0,142	28	2,76	0,104
355		0,153	30	3,05	0,143
450		0,220	41	4,09	0,172

На рис. 7 показан фрагмент осциллограммы колебаний инструмента и детали, на котором видно, что существует разрыв контакта между инструментом и деталью в тот момент, когда фреза, достигнув крайней точки упругой деформации, возвращается назад, а деталь еще продолжает движение до своей точки наибольшего отжатия. В момент разрыва контакта и вырезается формообразующая лунка. Поэтому значения высоты волны на обработанной поверхности (W_z) и наибольшего отклонения первой волны от линии упругого равновесия (h_{\max}) имеют разные величины.

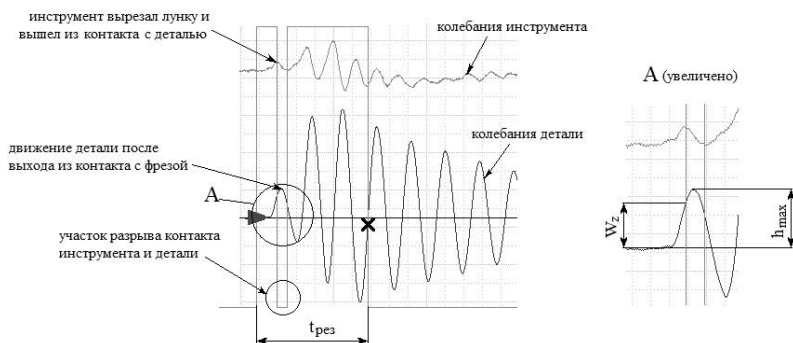


Рисунок 7 – Влияние разной жесткости инструмента и детали на их упругие отжатия при колебаниях

Коэффициент корреляции между частотой вращения шпинделя и высотой волн на обработанной поверхности равен 0,99. На рис. 8 показан график зависимости между ними.

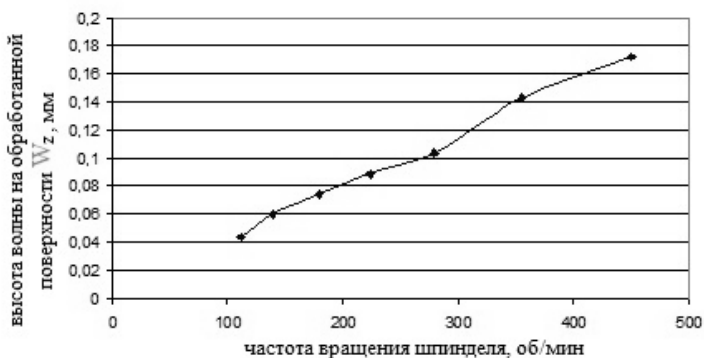


Рисунок 8 – Зависимость между частотой вращения шпинделя и высотой волн на обработанной поверхности после встречного концевое цилиндрического фрезерования

Уравнение регрессии имеет вид:

$$W_z = 0,0004 \cdot n_{\text{шп}} + 0,0045 \quad (2)$$

Из данных, приведенных в табл. 2, следует, что с увеличением частоты вращения шпинделя увеличивается и шаг волны на обработанной поверхности.

Причину периодичности повторения волн на обработанной поверхности следует искать на поверхности резания, которая от автоколебаний имеет волнистую форму. При движении подачи происходит периодическое срезания на ней выступов волн и прохождение впадин, что определяет толщину сечения срезаемого слоя. Наибольшая лунка образуется, когда толщина сечения минимальная, что соответствует прохождению резцом впадины. При срезании выступа волны толщина сечения срезаемого слоя постепенно увеличивается, что приводит к снижению амплитуды автоколебаний и уменьшению глубины вырезаемой лунки. В зависимости от частоты вращения шпинделя основание волны имеет разную ширину, т.е. количество резов, которое необходимо для его срезания, разное. Длина участка на поверхности резания, определяющая шаг волн на обработанной поверхности, по осциллограмме определяется временем (t) от начала резания и до впадины второй волны (рис. 9).

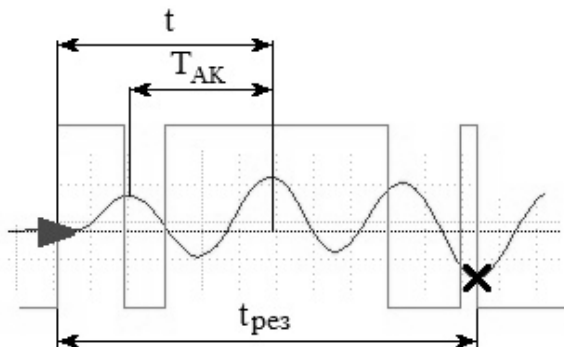


Рисунок 9 – Участок на осциллограмме, отражающий формирование шага волны на обработанной поверхности

В табл. 3 и 4 приведены характеристики автоколебаний и средние шаги волн на обработанной поверхности (соответственно) при фрезеровании с различными частотами вращения шпинделя.

Таблица 3 – Характеристики автоколебаний при разных частотах вращения шпинделя

Частота вращения шпинделя $n_{шп}$, об/мин	Период автоколебаний T_{AK} / частота f , мсек/Гц	Наибольший размах первой волны автоколебаний R_{1max} , мм	Время t /длина участка l , определяющего шаг волны, мсек/мм
112	1,8/555	0,053	1,92/0,61
140	1,8/555	0,074	2,20/0,88
180	1,86/537	0,113	2,52/1,30
224	1,86/537	0,147	2,64/1,70
280	1,98/505	0,174	3,00/2,42
355	1,98/505	0,257	2,94/3,00
450	1,98/505	0,313	2,88/3,73

Таблица 4 – Средние шаги волн на обработанной поверхности при фрезеровании с различными частотами вращения шпинделя.

Частота вращения шпинделя $n_{шп}$, об/мин	Средний шаг волны на обработанной поверхности S_{wcp} , мм
112	0,57
140	0,84
180	1,27
224	1,69
280	2,24
355	2,92
450	3,82

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что наибольшая погрешность между измеренным шагом и рассчитанным по осциллограмме равна 8%. Коэффициент корреляции между частотой вращения шпинделя и шагом волны на обработанной поверхности равен 0,99.

Уравнение регрессии имеет вид:

$$S_w = 0,0096 \cdot n_{\text{шп}} - 0,481 \quad (4)$$

На рис. 10 показан график зависимости между частотой вращения шпинделя и шагом волны на обработанной поверхности.

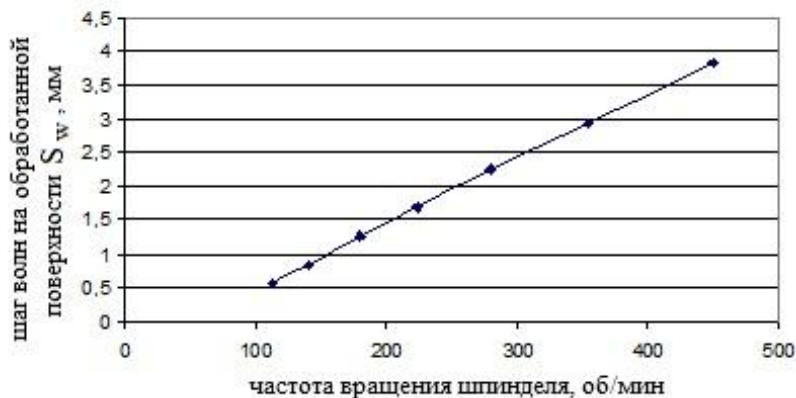


Рисунок 10 – Зависимость между частотой вращения шпинделя и шагом волн на обработанной поверхности

Выводы

На основании проведенных исследований установлены основные принципы оценки качественных показателей обработанной поверхности (на примере образования при резании волнистой поверхности) в зависимости от динамического состояния обрабатывающей системы при наличии в ней маложестких элементов.

1. При встречном концевом цилиндрическом фрезеровании волнистый профиль обработанной поверхности обусловлен волнистой формой поверхности резания.

2. Поверхность, обработанная при встречном концевом цилиндрическом фрезеровании с автоколебаниями, формируется резами инструмента, оставляемыми на детали первой волной автоколебаний.

3. Изменение толщины сечения срезаемого слоя при прохождении волнистой поверхности резания и тем самым изменение глубины лунки, вырезаемой инструментом на обработанной поверхности, обуславливается движением подачи.

4. Шаг волн на обработанной поверхности определяется количеством резцов, необходимых для срезания выступа первой волны автоколебаний, и величиной подачи на зуб

Список использованных источников: 1. Амосов И.С. Точность, вибрации и чистота поверхности при токарной обработке / И.С. Амосов, В.А. Скраган – Москва- Ленинград: Машгиз, 1958. – 92с. 2. Каширин А. И. Исследование вибраций при резании металлов. /А.И. Каширин. – Москва-Ленинград: изд-во академии наук СССР. 1944. – 144 с. 3. Крepak А. С. Исследование процесса резания жаропрочных сталей концевыми фрезами с разнонаклонными зубьями: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.171 «Теория обработки резанием» / А. С. Крepak – Тула, 1972. – 23 с. 4. Логоминов В. А. Формирование шероховатости обработанной поверхности при концевом цилиндрическом фрезеровании тонкостенных элементов деталей: дис. канд. техн. наук. 05.03.01: защищена 21.02.2013; утв. 25.04.2013 / Логоминов Виктор Алексеевич. – Запорожье, 2013. – 226 с. 5. Свинин В. М. Управление регенеративными автоколебаниями при фрезеровании на основе модуляции скорости резания: Дис. д-ра техн. наук: 05.03.01 / Свинин Валерий Михайлович. – Иркутск, 2008. – 342 с. 6. Tobias S. A. Theory of Regenerative Machine Tool Chatter / S. A. Tobias, W. Fiswick. – London: Engineering, 1958. – 258 p. 7. Tlustý J. The Stability of Machine Tools Against Self-Excited Vibrations in Machining. / J. Tlustý, M. Polacek // ASME International Research in Production Engineering. – 1963. – P. 465-474. 8. Olgac N. Dynamic and stability of variable pitch milling / N. Olgac R. Sipahi // Journal of Vibration and Control, 2007. – № 13(7). – P. 1031–1043. 9. Budak E. Analytical Prediction of Chatter Stability Conditions for Multi-Degree of Systems in Milling. Part I: Modeling / E. Budak, Y. Altintas // Transactions of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control. – 1998. – Vol. 120. – P. 22–30. 10. Budak E. An Analytical Design Method for Milling Cutters With Nonconstant Pitch to Increase Stability, Part 2: Application / E. Budak // ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2003. – Vol. 125. – P. 35–38. 11. Altintas Y. Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design / Y. Altintas. – 2013 – 365 p. 12. Altintas Y. Analytical Prediction of Stability Lobes in Milling / Y. Altintas, E. Budak // Annals of the CIRP. – 1995. – Vol. 44. – P. 357–362. 13. Altintas Y. Analytical Prediction of Chatter Stability and Design for Variable Pitch Cutters/ Y. Altintas, S. Engin, E. Budak // Trans. ASME, Manufacturing and Engineering and Science. – 1999. – Vol. 121 – P. 173–178. 14. Патент UA 94974 МПК (2006) G01H11/00; G01M7/02. Стенд для дослідження коливань при кінцевому циліндричному фрезеруванні тонкостінних елементів деталей. Логоминов Віктор Олексійович, Гермашев Антон Ігоревич, Дядя Сергій Іванович, Козлова Олена Борисівна. -u20140405981; заява 02.06.2014; опубл. 10.12.2014. 15. Разработка комплекса экспериментальных методов исследования виброустойчивости процесса резания концевыми фрезами с разнонаклонными зубьями / Ю. Н. Внуков, С. И. Дядя, Е. Б. Козлова, А. Е. Зубарев // Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві: збірник наукових праць [Текст]. – Вип.3(8). – О.:Наука і техніка, 2015. – С. 24-40. 16. Дядя С. И. Систематизация колебаний при концевом фрезеровании тонкостенных элементов деталей / С.И.Дядя, Е.Б.Козлова, Э.В.Кондратьев, А.Е.Зубарев, В.А.Кришталь // Вестник двигателестроения. №1, 2016. С.68-71. 17. Пат. UA 104343 Україна, МПК(2016.01) B23C 5/00; Фреза з регульованими кутами нахилу різальних кромок кожного зуба / Дядя С. І., Козлова О. Б., заявник та власник патенту ЗНТУ – №u201506918; заявл 13.07.2015; опубл 25.01.2016, Бюл. № 2.

Bibliography (transliterated): 1. Amosov I. S. Tochnost', vibracii i chistota poverhnosti pri tokarnoj obrabotke / I.S. Amosov, V.A. Skragan– Moskva- Leningrad: Mashgiz, 1958.-92s. 2. Kashirin A.I. Issledovanie vibracij pri rezanii metallov. /A.I. Kashirin. –Moskva-Leningrad: izd-vo akademii nauk SSSR. 1944. – 144s. 3. Krepak A. S. Issledovanie processa rezanija zharoprochnyh stalej koncevymi frezami s raznonaklonnymi zub'jami: avtoref. dis. na soiskanie nauchn. stepeni kand. tehn. nauk: spec. 05.171 «Teorija obrabotki rezaniem» / A.S. Krepak – Tula, 1972. – 23 s. 4. Logominov V.A. Formirovanie sherohovatosti obrabotannoj poverhnosti pri koncevom cilindricheskom frezerovanii tonkostennyh jelementov detalej: dis. kand. tehn. nauk. 05.03.01: zashishhena 21.02.2013: utv.

25.04.2013 / *Logominov Viktor Alekseevich*. – Zaporozh'e, 2013. – 226 s. **5.** *Svinin V. M.* Upravlenie regenerativnymi avtokolebanijami pri frezerovanii na osnove moduljacji skorosti rezanija: Dis. d-ra tehn. nauk: 05.03.01 / *Svinin Valerij Mihajlovich*. – Irkutsk, 2008. – 342 s. **6.** *Tobias S. A.* Theory of Regenerative Machine Tool Chatter / *S. A. Tobias, W. Fiswick*. – London: Engineering, 1958. – 258 s. **7.** *Thusty J.* The Stability of Machine Tools Against Self-Excited Vibrations in Machining. / *J. Thusty, M. Polacek* // ASME International Research in Production Engineering. – 1963. – R. 465-474. **8.** *Olgac N.* Dynamic and stability of variable pitch milling / *N. Olgac R. Sipahi* // Journal of Vibration and Control, 2007. – № 13(7). – R. 1031-1043. **9.** *Budak E.* Analytical Prediction of Chatter Stability Conditions for Multi-Degree of Systems in Milling. Part I: Modeling / *E. Budak, Y. Altintas* // Transactions of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control. – 1998. – Vol. 120. – R. 22-30. **10.** *Budak E.* An Analytical Design Method for Milling Cutters With Nonconstant Pitch to Increase Stability, Part 2: Application / *E. Budak* // ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2003. – Vol. 125. – R. 35-38. **11.** *Altintas Y.* Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design / *Y. Altintas*. – 2013 – 365 p. **12.** *Altintas Y.* Analytical Prediction of Stability Lobes in Milling / *Y. Altintas, E. Budak* // Annals of the CIRP. – 1995. – Vol. 44. – P. 357-362. **13.** *Altintas Y.* Analytical Prediction of Chatter Stability and Design for Variable Pitch Cutters/ *Y. Altintas, S. Engin, E. Budak* // Trans. ASME, Manufacturing and Engineering and Science. – 1999. – Vol. 121 – P. 173-178. **14.** Patent UA 94974 MPK (2006) G01N11/00; G01M7/02. Stend dlja doslidzhennja kolivan' pri kincevomu cilindrichnomu frezeruvanni tonkostinnih elementiv detalej. *Logominov Viktor Oleksijovich, Germashev Anton Igorevich, Djadja Sergij Ivanovich, Kozlova Olena Borisivna*. -u201405981; zajava 02.06.2014; opublik. 10.12.2014. **15.** Razrabotka kompleksa jeksperimental'nyh metodik issledovanija vibroustojchivosti processa rezanija koncevymi frezami s raznonaklonnymi zub'jami / *Ju. N. Vnukov, S. I. Djadja, E. B. Kozlova, A. E. Zubarev* // Informacijni tehnologiji v osviti, nauci ta virobnictvi: zbirnik naukovih prac' Tekst.–Vip.3(8).–O.:Nauka i tehnika, 2015.–S. 24 – 40. **16.** *Djadja S. I.* Sistematizacija kolebanij pri koncevom frezerovanii tonkostennyh jelementov detalej / *S.I.Djadja, E.B.Kozlova, Je.V.Kondratjuk, A.E.Zubarev, V.A.Krishtal'* //Vestnik dvigatelestroenija. №1, 2016. S.68-71. **17.** Pat. UA 104343 Ukraina, MPK(2016.01) V23S 5/00; Freza z regul'ovanimi kutami nahilu rizal'nih kromok kozhnogo zuba / *Djadja S. I., Kozlova O. B.*, , zajavnik ta vlasnik patentu ZNTU – №u201506918; zajavl 13.07.2015; opubl 25.01.2016, Bjul. № 2.